

**ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM TENAGA
LISTRIK DI KSO PERTAMINA EP – GEO CEPU INDONESIA DISTRIK 1
KAWENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP 12.6**



PUBLIKASI ILMIAH

Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I pada Jurusan
Teknik Elektro
Fakultas Teknik

Oleh:

VERY BAGUS SAPUTRA

D 400 120 036

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA
2016**

HALAMAN PERSETUJUAN

**ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM TENAGA
LISTRIK DI KSO PERTAMINA EP – GEO CEPU INDONESIA DISTRIK 1
KAWENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP 12.6**

PUBLIKASI ILMIAH

Oleh:

VERY BAGUS SAPUTRA

D 400 120 036

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'J' followed by a horizontal line and a downward stroke.

Ir. Jatmiko, M.T.

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM TENAGA LISTRIK DI KSO PERTAMINA EP – GEO CEPU INDONESIA DISTRIK 1 KAWENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP 12.6

Oleh:

VERY BAGUS SAPUTRA

D 400 120 036

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pada hari , 2016
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dewan Penguji:

1. Ir. Jatmiko, M.T
(Ketua Dewan Penguji)
2. Agus Supardi, S.T., M.T
(Anggota I Dewan Penguji)
3. Hasyim Asy'ari, S.T., M.T
(Anggota II Dewan Penguji)



Dekan,

Ir. Sri Sunarjono, M.T., Ph.D

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 14 April 2016

Penulis



VERY BAGUS SAPUTRA

D 400 120 036

ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM TENAGA LISTRIK DI KSO PERTAMINA EP – GEO CEPU INDONESIA DISTRIK 1 KAWENGAN MENGUNAKAN SOFTWARE ETAP 12.6

VERY BAGUS SAPUTRA

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Pheve94@Gmail.Com

Abstrak

Studi gangguan hubung singkat merupakan hal yang penting dalam perencanaan pembuatan sistem tenaga listrik. Hubung singkat terjadi ketika penghantar (kabel) yang bertegangan tersambung langsung ke penghantar netral. Karena tidak melalui tahanan berupa peralatan listrik, maka arus listrik hubung singkat yang mengalir sangat besar. Untuk mengatasi hal ini maka diperlukan analisis gangguan hubung singkat sehingga besar arus gangguan yang mengalir pada sistem dapat diketahui dan peralatan proteksi yang akan digunakan dapat ditentukan.

Penelitian ini akan melakukan analisis arus hubung singkat tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa, dan dua fasa ke tanah. Penelitian dimulai dari pengumpulan data-data yang diperlukan untuk analisis. Kemudian membuat *single line* dengan menggunakan ETAP Power Station 12.6 sesuai data yang telah didapat. Setelah *single line* jadi kemudian dilakukan simulasi hubung singkat untuk mengetahui apakah *single line* yang telah dibuat sudah sesuai atau belum. Jika *single line* belum sesuai maka dilakukan perbaikan lagi. Setelah itu dilakukan simulasi hubung singkat dengan memvariasi lokasi gangguan. Yaitu di dekat sumber pembangkit, di dekat beban, dan diantara pembangkit dan beban.

Hasil simulasi menunjukkan besar arus hubung singkat tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa, dan dua fasa ke tanah. Lokasi gangguan juga mempengaruhi besar arus hubung singkat yang terjadi. Semakin dekat sumber pembangkit arus hubung singkat semakin besar.

Kata kunci: hubung singkat, gangguan simetris, gangguan asimetris, ETAP 12.6

Abstract

Study of short circuit is important in planning the manufacture of electric power systems. Short circuit occurs when the phase conductor is connected directly to the neutral conductor. Because no such resistance electrical appliancesvthus the short circuit current flow is proufoundly big. To mitigate this, the analysis is necessary so that a large short circuit fault current flow in the system can be identified and protective equipment to be used can be determined.

This study will be to analyze the three-phase short-circuit current, one phase to ground, two-phase and two phase to ground. Research began on the collection of data required for analysis. Then create a single line using ETAP Power Station 12.6 according to the data that has been obtained. Continued a single line so then do short circuit simulation to determine whether a single line that has been made is appropriate or not. If a single line is not appropriate then repaired again. After the simulation is done by varying the location of the short circuit interruption. That is near the source of plant, near the load, and between the generator and the load.

The simulation results determine the short-circuit current three-phase, single phase to ground, two-phase and two phase to ground. Location disorder also affects a large short-circuit current occurs. The short circuit current is more bigger when the its location near with power plant.

Keywords: short circuit, symmetrical disturbance, asymmetrical disturbance, ETAP 12.6

1. PENDAHULUAN

Listrik merupakan kebutuhan sekunder yang penting bagi seluruh masyarakat di era yang modern ini, bahkan banyak industri juga memerlukan listrik untuk proses produksinya. Pada sistem tenaga listrik, studi arus gangguan hubung singkat merupakan hal yang penting terutama untuk perencanaan. Hubung singkat terjadinya ketika konduktor/penghantar bertegangan terhubung dengan penghantar bertegangan atau terhubung dengan penghantar netral (*ground*) secara langsung. Istilah gangguan atau gangguan hubung singkat digunakan untuk menjelaskan suatu hubungan singkat. Untuk mengatasi gangguan hubung singkat tersebut, perlu dilakukan analisis gangguan hubung singkat sehingga sistem proteksi yang tepat pada sistem tenaga listrik dapat ditentukan. Analisis gangguan hubung singkat adalah analisis yang mempelajari kontribusi arus gangguan hubung singkat yang mungkin mengalir pada setiap cabang didalam sistem sewaktu gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi di dalam sistem tenaga listrik.

Gangguan hubung singkat terjadi akibat faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal dari gangguan adalah rusaknya peralatan listrik. Sedangkan faktor eksternal adalah cuaca buruk, badai, hujan, bencana, runtuhnya pohon, petir, dan lain-lain. Selain faktor internal dan faktor eksternal gangguan terdiri dari gangguan temporer atau permanent. Gangguan temporer bisanya diamankan dengan CB (*Circuit Breaker*) atau pengaman lainnya, Sedangkan gangguan permanent adalah gangguan yang menyebabkan kerusakan permanent pada sistem. Seperti kegagalan isolator, kerusakan penghantar, dan kerusakan pada peralatan. Pada gangguan permanen sering terjadi pada saluran bawah tanah.

Gangguan hubung singkat merupakan gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Gangguan hubung singkat dapat menyebabkan aliran arus menjadi besar, besarnya arus listrik yang mengalir dapat merusak peralatan listrik jika tidak dilengkapi dengan sistem proteksi yang tepat. Besar kecil aliran arus hubung singkat dipengaruhi oleh letak terjadinya gangguan. jika gangguan semakin dekat dengan sumber, maka arus gangguan akan semakin besar begitu sebaliknya (Amira, 2014). Perluasan sistem tenaga listrik perlu dianalisa kembali untuk mengetahui rating peralatan pemutus tegangan, misalnya *Circuit Breaker* (CB). Supaya *Circuit Breaker* (CB) dapat mengamankan dari gangguan sistem tenaga listrik. Gangguan hubung singkat terdiri dari gangguan simetris dan hubung singkat tidak simetris. Perhitungan arus gangguan hubung singkat simetris dan tidak simetris dapat dilakukan dengan alat bantu perhitungan, yaitu komputer digital dengan bantuan software Matlab (Aulia, 2011).

Cara mengatasi gangguan hubung singkat, perlu dilakukan analisis gangguan hubung singkat untuk mengetahui besar arus hubung singkat yang akan terjadi. Sehingga sistem proteksi yang tepat pada sistem tenaga listrik dapat ditentukan. Analisis gangguan hubung singkat adalah analisis yang mempelajari kontribusi arus gangguan hubung singkat yang mungkin mengalir pada setiap cabang didalam sistem sewaktu gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi di dalam sistem tenaga listrik. Analisis gangguan hubung singkat merupakan suatu hal yang penting untuk menentukan rating arus hubung singkat, guna untuk melindungi perangkat dan peralatan sistem distribusi dari efek yang ditimbulkan beban. Hal ini dapat diketahui dengan menggunakan metode analisis hubung singkat seimbang dan tidak seimbang (Mathur, 2015). Gangguan tanah dapat berakibat fatal pada sistem tenaga listrik, jika tidak memperhatikan sistem pengamannya. Gangguan tanah terjadi karena adanya tegangan induksi kumparan-kumparan transformator terhadap struktur logam disekitarnya. Gangguan sistem isolasi (*breakdown isolation*) dapat menyebabkan kebocoran arus sehingga dapat menyebabkan hubung singkat. Kesalahan tidak simetri sering terjadi pada jalur jaringan yang dapat menyebabkan gangguan signifikan kekuasaan pasokan sistem jika tidak terdeteksi dan terisolasi di dekat real time. Real time mendeteksi kesalahan yang diperlukan sistem proteksi untuk mengisolasi garis rusak sebelum masalah stabilitas utama timbul (Saha 2012). Komponen simetris dapat digunakan untuk mensimulasikan operasi simetris dan tidak simetris dari sistem tenaga listrik. Penelitian ini memberikan bukti bahwa rangkaian ekuivalen baru yang dikembangkan dapat menggantikan rangkaian ekuivalen dengan menggunakan perhitungan untuk hubung singkat satu fasa ke tanah dan hubung singkat dua fasa ke tanah. (moura, 2015).

Sistem tenaga memiliki garis kopling parsial dibawah level tegangan yang berbeda, hal tersebut dikarena pembangunan sistem tenaga. Ketika gangguan terjadi pada garis-garis ini, impedansi urutan nol membawa kesulitan untuk perhitungan arus hubung singkat. untuk mengatasi hal tersebut maka komponen diubah menjadi komponen urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol (C. Fan, 2015). Metode umum untuk analisis beberapa gangguan hubung singkat tiga fasa dan enam fasa campuran sistem tenaga dengan garis untransposed. Metode ini sistematis untuk semua jenis gangguan (Youssef, 2016). Tugas akhir ini akan melakukan analisis untuk mendapatkan suatu nilai arus gangguan hubung singkat di KSO Pertamina EP-Geo Cepu Indonesia Distrik 1 Kawengan. Agar analisis tersebut dapat dilakukan dengan cepat dan akurat, maka diperlukan suatu media analisis melalui bantuan komputer yaitu dengan menggunakan *software* ETAP Power Station 12.6.

1.1 Rumusan Masalah

Berapa besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa dan dua fasa ke tanah pada sistem tenaga listrik di KSO Pertamina EP – Geo Cepu Indonesia Distrik 1 Kawengan.

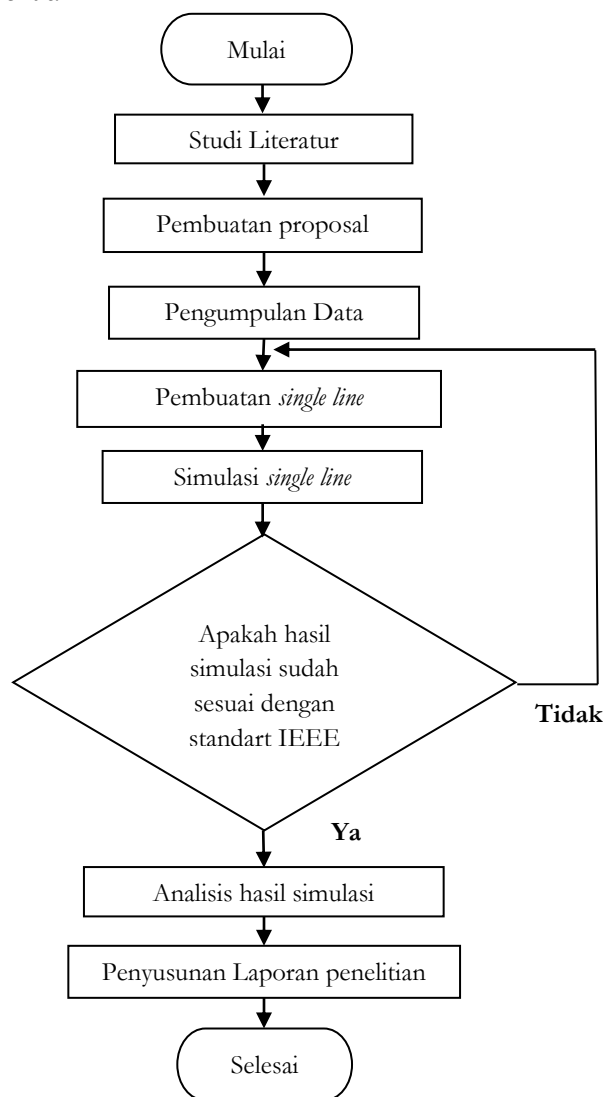
1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian untuk mengetahui besarnya arus gangguan hubung singkat tiga fasa ketanah, satu fasa ke tanah, dua fasa dan dua fasa ketanah pada sistem tenaga listrik di KSO Pertamina EP – Geo Cepu Indonesia Distrik 1 Kawengan.

1.3 Manfaat Penelitian

1. Diharapkan dapat memberikan tambahan informasi tentang *software* ETAP Power Station 12.6 sebagai program simulasi yang mempunyai berbagai fasilitas yang mendukung untuk simulasi sebuah sistem. Khususnya dalam hal gangguan hubung singkat.
2. Hasil analisis gangguan hubung singkat dapat digunakan untuk mengetahui besar kapasitas peralatan pemutus CB (*Circuit Breaker*) yang akan digunakan untuk sistem tenaga listrik.

2.4 Flowchart Penelitian

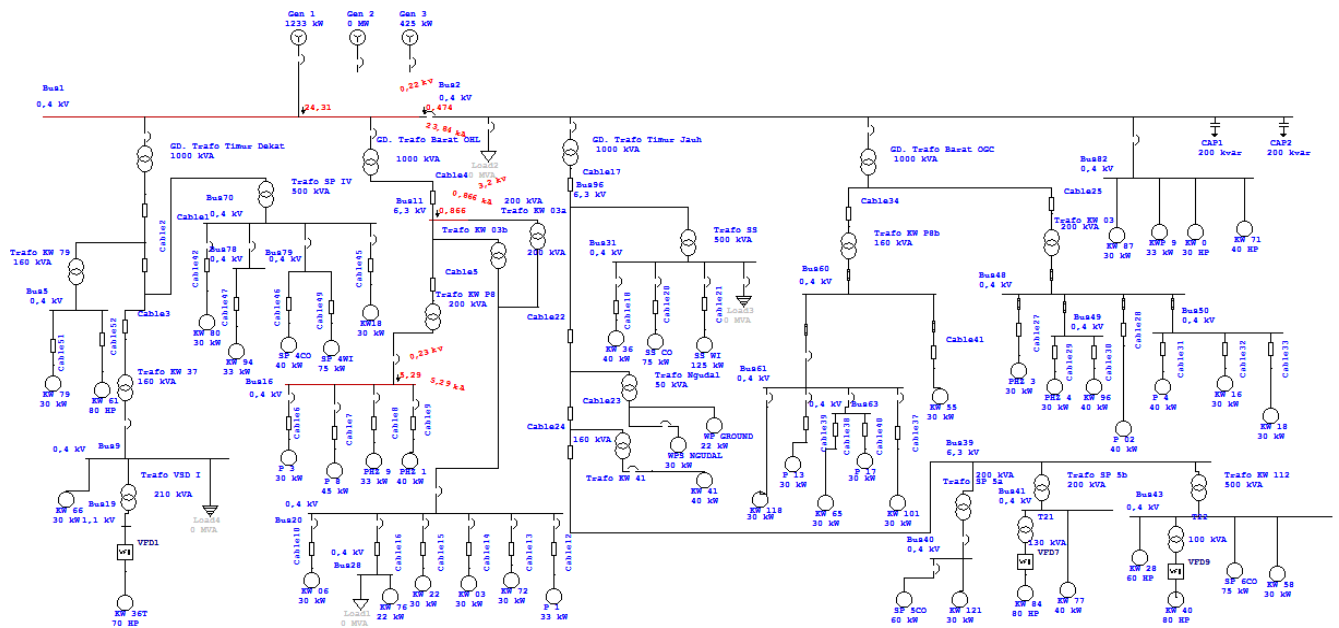


Gambar 2. Flowchart Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Simulasi Gangguan Hubung Singkat

Simulasi gangguan hubung singkat dilakukan pada model jaringan sistem tenaga listrik di KSO Pertamina EP-Geo Cepu Indonesia Distrik 1 Kawengan sesuai data beban dan *single line diagram* yang ada. Simulasi dimulai dengan pemilihan daerah mana saja yang mengalami gangguan hubung singkat. Penempatan gangguan hubung singkat ini ditempatkan di tiga tempat, yaitu: di dekat pembangkit, di dekat beban, dan diantara pembangkit dan beban. Gangguan yang didekat pembangkit diletakkan pada bus 1, untuk yang dekat beban diletakkan pada bus 16, dan diantara pembangkit dan beban diletakkan pada bus 11. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui besar arus gangguan hubung singkat yang akan terjadi digangguan. Jenis gangguan yang disimulasikan meliputi gangguan tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa, dan dua fasa ke tanah.



Gambar 3. Single line diagram

3.2 Simulasi Analisis Arus Hubung Singkat Tiga Fasa

Hubung singkat tiga fasa terjadi ketika ketiga fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat secara bersamaan. Simulasi ini digunakan untuk mengetahui besar arus hubung singkat tiga fasa. Simulasi menggunakan *software* ETAP Power Station 12.6 dengan hubung singkat *maximum*, yaitu arus hubung singkat pada bus yang terganggu dihitung setelah $1/2$ siklus ($1/2 \text{ cycle}$). Gangguan hubung singkat divariasi dengan meletakkan gangguan di bus 1, bus 11 dan bus 16. Tabel 1, tabel 2, dan tabel 3 merupakan hasil report arus hubung singkat tiga fasa pada bus 1, bus 11, dan bus 16. Dimana bus 1 terletak dekat dengan sumber pembangkit dengan besar arus hubung singkat mencapai 21.552 kA, sedangkan bus 11 terletak diantara sumber pembangkit dan beban dengan besar arus hubung singkat mencapai 0.772 kA, dan bus 16 terletak dekat dengan beban dengan besar arus gangguan hubung singkat mencapai 4.972 kA. Dari ketiga tabel tersebut arus hubung singkat paling besar terletak pada bus 1 yaitu sebesar 21.522 kA.

Tabel 1. Hasil report arus hubung singkat tiga fasa pada bus 1

Contribution		1/2 Cycle				
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	kA Real	kA Imaginary	Imag. /Real	kA Symm. Magnitude
Bus1	Total	0.00	4.259	-21.127	5.0	21.552
Bus10	Bus1	7.03	0.619	-1.653	2.7	1.765
Bus3	Bus1	3.59	0.705	-2.143	3.0	2.256
Gen 1	Bus1	100.00	0.578	-10.985	19.0	11.000
Bus46	Bus2	3.66	0.776	-2.160	2.8	2.295
Bus29	Bus2	14.62	1.416	-3.387	2.4	3.671
KW 87	Bus82	100.00	0.042	-0.208	4.9	0.212
KWP 9	Bus82	100.00	0.044	-0.229	5.2	0.233
KW 0	Bus82	100.00	0.037	-0.157	4.3	0.161
KW 71	Bus82	100.00	0.042	-0.206	4.9	0.211

Tabel 2. Hasil report arus hubung singkat tiga fasa pada bus 11

Contribution		1/2 Cycle				
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	kA Real	kA Imaginary	Imag. /Real	kA Symm. Magnitude
Bus11	Total	0.00	0.258	-0.728	2.8	0.772
Bus10	Bus11	17.16	0.216	-0.613	2.8	0.650
Bus15	Bus11	0.46	0.018	-0.055	3.0	0.058
Bus14	Bus11	8.42	0.011	-0.030	2.6	0.032
Bus14	Bus11	8.42	0.011	-0.030	2.6	0.032

Tabel 3. Hasil report arus hubung singkat tiga fasa pada bus 16

Contribution		1/2 Cycle					
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	kA Real	kA Imaginary	Imag. /Real	kA Symm. Magnitude	
Bus16	Total	0.00	1.410	-4.768	3.4	4.972	
Bus17	Bus16	29.50	0.080	-0.158	2.0	0.177	
Bus27	Bus16	7.16	0.086	-0.364	4.2	0.374	
Bus26	Bus16	15.82	0.062	-0.179	2.9	0.190	
Bus18	Bus16	23.93	0.132	-0.318	2.4	0.345	
Bus15	Bus16	64.71	1.050	-3.748	3.6	3.892	

3.3 Simulasi Analisis Arus Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi ketika sebuah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat dengan tanah. Simulasi ini digunakan untuk mengetahui besar arus hubung singkat satu fasa ke tanah. Simulasi menggunakan *software* ETAP Power Station 12.6 dengan hubung singkat *maximum*, yaitu arus hubung singkat pada bus yang terganggu dihitung setelah 1/2 siklus (*1/2 cycle*). Gangguan hubung singkat diletakkan di bus 1, bus 11 dan bus 16. Tabel 4, tabel 5, dan tabel 6 merupakan hasil report arus hubung singkat satu fasa ke tanah pada bus 1, bus 11, dan bus 16. Dimana bus 1 terletak dekat dengan sumber pembangkit dengan besar arus hubung singkat mencapai 23.837 kA, sedangkan bus 11 terletak diantara sumber pembangkit dan beban dengan besar arus hubung singkat mencapai 0.866 kA, dan bus 16 terletak dekat dengan beban dengan besar arus gangguan hubung singkat mencapai 5.287 kA. Dari ketiga tabel tersebut arus hubung singkat paling besar terletak pada bus 1 yaitu sebesar 23.837 kA.

Tabel 4. Hasil report arus hubung singkat satu fasa ke tanah pada bus 1

Contribution		Line-To-Ground Fault											
From Bus ID	To Bus ID	% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)					
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic	
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
Bus1	Total	0.00	0.0	97.14	-115.5	92.82	115.7	23.837	-78.9	0.000	0.0	0.000	0.0
Bus10	Bus1	58.75	61.0	98.99	-90.5	55.02	120.1	1.283	-70.5	0.627	110.9	0.656	108.1
Bus3	Bus1	55.91	62.2	98.98	-90.5	55.53	116.9	1.639	-72.8	0.801	108.6	0.839	105.7
Gen 1	Bus1	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	16.262	-82.7	3.983	-70.3	4.164	-73.1
Bus46	Bus2	55.97	62.2	98.98	-90.5	55.53	117.0	1.668	-71.3	0.815	110.2	0.853	107.3
Bus29	Bus2	62.11	57.8	99.05	-90.4	56.60	124.8	2.667	-68.4	1.304	113.1	1.365	110.2
KW 87	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.154	-79.6	0.075	101.9	0.079	99.0
KWP 9	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.170	-80.1	0.083	101.3	0.087	98.5
KW 0	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.117	-77.9	0.057	103.6	0.060	100.7
KW 71	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.153	-79.6	0.075	101.9	0.078	99.0

Tabel 5. Hasil report arus hubung singkat satu fasa ke tanah pada bus 11

Contribution		Line-To-Ground Fault											
From Bus ID	To Bus ID	% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)					
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic	
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
Bus11	Total	0.00	0.0	88.01	-116.5	101.26	112.2	0.866	-66.3	0.000	0.0	0.000	0.0
Bus10	Bus11	25.29	-51.8	89.82	-112.7	95.76	110.6	0.775	-66.2	0.045	-65.8	0.046	-66.9
Bus15	Bus11	0.34	-56.3	87.92	-116.6	101.43	112.2	0.043	-67.6	0.021	113.0	0.022	111.8
Bus14	Bus11	59.62	-62.6	54.39	-120.9	99.64	89.7	0.024	-65.3	0.012	115.3	0.012	114.2
Bus14	Bus11	59.62	-62.6	54.39	-120.9	99.64	89.7	0.024	-65.3	0.012	115.3	0.012	114.2

Tabel 6. Hasil report arus hubung singkat satu fasa ke tanah pada bus 16

Contribution		Line-To-Ground Fault											
From Bus ID	To Bus ID	% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)					
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic	
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
Bus16	Total	0.00	0.0	99.25	-116.3	94.72	117.5	5.287	-74.8	0.000	0.0	0.000	0.0
Bus17	Bus16	20.87	-50.2	95.55	-122.0	104.99	118.7	0.125	-64.5	0.062	115.7	0.063	115.3
Bus27	Bus16	5.07	-67.5	97.62	-117.4	97.26	117.4	0.265	-78.1	0.132	102.1	0.133	101.7
Bus26	Bus16	11.19	-57.9	96.47	-119.1	100.32	117.8	0.134	-72.2	0.067	108.0	0.067	107.6
Bus18	Bus16	16.94	-54.5	95.59	-120.8	103.15	118.2	0.244	-68.8	0.122	111.4	0.122	111.0
Bus15	Bus16	84.00	39.2	99.84	-90.1	80.07	144.2	4.523	-75.2	0.382	-71.7	0.384	-72.1

3.4 Simulasi Analisis Arus Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan hubung singkat dua fasa terjadi ketika dua buah fasa dari sistem tenaga listrik hubung singkat. Simulasi ini digunakan untuk mengetahui besar arus hubung singkat dua fasa. Simulasi menggunakan *software* ETAP Power Station 12.6 dengan hubung singkat *maximum*, yaitu arus hubung singkat pada bus yang terganggu dihitung setelah 1/2 siklus (*1/2 cycle*). Gangguan hubung singkat diletakkan di bus 1, bus 11 dan bus 16. Tabel 7, tabel 8, dan tabel 9 merupakan hasil report arus hubung singkat dua fasa pada bus 1, bus 11, dan bus 16. Dimana bus 1 terletak dekat dengan sumber pembangkit dengan besar arus hubung singkat mencapai 18.938 kA, sedangkan bus 11 terletak diantara sumber pembangkit dan beban dengan besar arus hubung singkat mencapai 0.673 kA, dan bus 16 terletak dekat dengan beban dengan besar arus gangguan hubung singkat mencapai 4.314 kA. Dari ketiga tabel tersebut arus hubung singkat paling besar terletak pada bus 1 yaitu sebesar 18.938 kA.

Tabel 7. Hasil report arus hubung singkat dua fasa pada bus 1

Contribution		Line-To-Line Fault														
From Bus ID	To Bus ID	% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)						Sequence Current (kA)		
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic		I1	I2	I0
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.			
Bus1	Total	98.55	-0.8	49.28	179.2	49.28	179.2	0.000	0.0	18.938	-167.9	18.938	12.1	10.934	10.934	0.000
Bus10	Bus1	84.79	1.6	7.03	-79.3	86.19	177.0	0.035	-27.3	1.540	-160.0	1.517	21.0	0.895	0.870	0.000
Bus3	Bus1	86.31	0.3	3.59	-120.4	84.53	178.2	0.044	-29.6	1.969	-162.3	1.939	18.7	1.144	1.112	0.000
Gen 1	Bus1	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.212	152.1	9.674	-175.0	9.853	4.3	5.581	5.694	0.000
Bus46	Bus2	86.29	0.3	3.66	-118.9	84.56	178.2	0.045	-28.0	2.003	-160.7	1.973	20.3	1.164	1.131	0.000
Bus29	Bus2	84.08	4.2	14.62	-77.1	87.49	174.7	0.072	-25.1	3.203	-157.8	3.155	23.2	1.862	1.809	0.000
KW 87	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.004	-36.4	0.185	-169.0	0.182	11.9	0.107	0.104	0.000
KWP 9	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.005	-36.9	0.204	-169.6	0.201	11.4	0.118	0.115	0.000
KW 0	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.003	-34.6	0.140	-167.3	0.138	13.7	0.082	0.079	0.000
KW 71	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.004	-36.3	0.184	-169.0	0.181	12.0	0.107	0.104	0.000

Tabel 8. Hasil report arus hubung singkat dua fasa pada bus 11

Contribution		Line-To-Line Fault														
From Bus ID	To Bus ID	% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)						Sequence Current (kA)		
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic		I1	I2	I0
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.			
Bus1	Total	99.43	-0.4	49.71	179.6	49.71	179.6	0.000	0.0	0.673	-160.1	0.673	19.9	0.388	0.388	0.000
Bus10	Bus11	99.40	-0.4	62.94	-173.3	37.78	167.6	0.001	161.2	0.566	-160.0	0.567	19.9	0.327	0.327	0.000
Bus15	Bus11	99.43	-0.4	50.06	179.8	49.37	179.4	0.001	-20.0	0.051	-161.6	0.050	18.7	0.029	0.029	0.000
Bus14	Bus11	86.92	-3.1	85.57	-177.6	8.42	98.9	0.000	-17.7	0.028	-159.3	0.028	21.1	0.016	0.016	0.000
Bus14	Bus11	86.92	-3.1	85.57	-177.6	8.42	98.9	0.000	-17.7	0.028	-159.3	0.028	21.1	0.016	0.016	0.000

Tabel 9. Hasil report arus hubung singkat dua fasa pada bus 16

Contribution		Line-To-Line Fault														
From Bus ID	To Bus ID	% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)						Sequence Current (kA)		
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic		I1	I2	I0
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.			
Bus16	Total	99.81	-0.1	49.91	179.9	49.91	179.9	0.000	0.0	4.314	-163.4	4.314	16.6	2.491	2.491	0.000
Bus17	Bus16	99.89	-0.1	71.17	-166.4	35.06	151.2	0.000	-16.8	0.153	-153.2	0.153	26.9	0.089	0.088	0.000
Bus27	Bus16	99.83	-0.1	55.64	-177.5	44.32	176.6	0.001	-30.4	0.325	-166.8	0.324	13.3	0.188	0.187	0.000
Bus26	Bus16	99.86	-0.1	61.81	-173.1	39.25	168.8	0.001	-24.5	0.165	-160.9	0.164	19.2	0.095	0.095	0.000
Bus18	Bus16	99.88	-0.1	67.66	-169.5	35.63	159.4	0.001	-21.1	0.299	-157.5	0.298	22.6	0.173	0.172	0.000
Bus15	Bus16	90.21	20.9	64.87	-86.2	94.35	159.8	0.003	155.8	3.377	-164.2	3.380	15.8	1.950	1.951	0.000

3.5 Simulasi Analisis Arus Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah

Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi ketika dua buah fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat dengan tanah. Simulasi ini digunakan untuk mengetahui besar arus hubung singkat dua fasa ke tanah. Simulasi menggunakan *software* ETAP Power Station 12.6 dengan hubung singkat *maximum*, yaitu arus hubung singkat pada bus yang terganggu dihitung setelah 1/2 siklus (*1/2 cycle*). Gangguan hubung singkat diletakkan di bus 1, bus 11 dan bus 16. Tabel 10, tabel 11, dan tabel 12 merupakan hasil report arus hubung singkat dua fasa ke tanah pada bus 1, bus 11, dan bus 16. Dimana bus 1 terletak dekat dengan sumber pembangkit dengan besar arus hubung singkat mencapai 23.335 kA, sedangkan bus 11 terletak diantara sumber pembangkit dan beban dengan besar arus hubung singkat mencapai 0.883 kA, dan bus 16 terletak dekat dengan beban dengan besar arus gangguan hubung singkat mencapai 5.264 kA. Dari ketiga tabel tersebut arus hubung singkat paling besar terletak pada bus 1 yaitu sebesar 23.335 kA.

Tabel 10. Hasil report arus hubung singkat dua fasa ke tanah pada bus 1

Contribution		Line-To-Line-To-Ground Fault														
From Bus ID	To Bus ID	% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)						Sequence Current (kA)		
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic		I1	I2	I0
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.			
Bus1	Total	88.91	0.8	0.00	0.0	0.00	0.0	0.000	0.0	22.298	156.6	23.335	45.4	15.166	6.576	8.602
Bus10	Bus1	53.31	4.9	7.03	-79.3	54.48	177.5	0.719	-70.6	1.563	-172.8	1.577	33.7	1.242	0.523	0.000
Bus3	Bus1	53.34	1.7	3.59	-120.4	51.52	178.3	0.919	-72.9	1.998	-175.1	2.016	31.4	1.587	0.669	0.000
Gen 1	Bus1	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	4.559	108.1	14.944	137.2	14.201	54.2	7.741	3.425	8.772
Bus46	Bus2	53.35	1.8	3.66	-118.9	51.58	178.3	0.935	-71.4	2.033	-173.5	2.051	32.9	1.615	0.680	0.000
Bus29	Bus2	55.46	9.2	14.62	-77.1	58.26	174.7	1.495	-68.4	3.251	-170.6	3.280	35.9	2.583	1.088	0.000
KW 87	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.086	-79.7	0.188	178.2	0.189	24.6	0.149	0.063	0.000
KWP 9	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.095	-80.2	0.207	177.6	0.209	24.1	0.164	0.069	0.000
KW 0	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.066	-77.9	0.143	179.9	0.144	26.4	0.113	0.048	0.000
KW 71	Bus82	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	0.086	-79.7	0.186	178.2	0.188	24.7	0.148	0.062	0.000

Tabel 11. Hasil report arus hubung singkat dua fasa ke tanah pada bus 11

Contribution		Line-To-Line-To-Ground Fault														
From Bus ID	To Bus ID	% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)						Sequence Current (kA)		
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic		I1	I2	I0
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.			
Bus11	Total	88.12	-6.5	0.00	0.0	0.00	0.0	0.000	0.0	0.883	166.9	0.767	58.2	0.547	0.229	0.322
Bus10	Bus11	82.29	-4.1	25.51	169.2	20.17	88.4	0.052	118.9	0.778	164.1	0.673	61.9	0.461	0.193	0.322
Bus15	Bus11	88.26	-6.6	0.43	-163.2	0.40	43.9	0.025	-62.3	0.054	-174.5	0.050	32.6	0.041	0.017	0.000
Bus14	Bus11	54.86	-9.4	52.82	179.3	8.42	98.9	0.014	-60.0	0.030	-172.2	0.028	34.9	0.023	0.009	0.000
Bus14	Bus11	54.86	-9.4	52.82	179.3	8.42	98.9	0.014	-60.0	0.030	-172.2	0.028	34.9	0.023	0.009	0.000

Tabel 12. Hasil report arus hubung singkat dua fasa ke tanah pada bus 16

Contribution		Line-To-Line-To-Ground Fault														
From Bus ID	To Bus ID	% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)						Sequence Current (kA)		
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic		I1	I2	I0
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.			
Bus16	Total	93.43	1.6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.000	0.0	5.024	162.6	5.264	48.8	3.424	1.554	1.873
Bus17	Bus16	100.52	-3.5	25.89	-151.3	26.40	53.3	0.067	-65.8	0.155	-165.6	0.158	39.0	0.122	0.055	0.000
Bus27	Bus16	94.37	0.1	6.29	-168.6	6.41	36.0	0.141	-79.4	0.329	-179.2	0.335	25.4	0.258	0.117	0.000
Bus26	Bus16	96.49	-1.5	13.89	-159.0	14.16	45.6	0.072	-73.5	0.167	-173.3	0.170	31.3	0.131	0.059	0.000
Bus18	Bus16	98.60	-2.8	21.01	-155.6	21.42	49.0	0.130	-70.1	0.303	-169.9	0.309	34.7	0.237	0.107	0.000
Bus15	Bus16	80.50	25.1	64.81	-86.3	82.96	158.4	0.409	106.8	4.178	157.2	4.348	52.5	2.681	1.218	1.873

3.6 Hasil Perhitungan Manual Arus Hubung Singkat

Hasil perhitungan digunakan untuk membandingkan hasil analisis hubung singkat. Perbandingan diambil dari hasil analisa perhitungan manual dengan hasil simulasi menggunakan *software* ETAP Power Station 12.6. Dalam perhitungan manual diperlukan data-data masukan, salah satunya yaitu data impedansi. Data impedansi diambil dari hasil report yang ada di ETAP Power Station 12.6. Nilai impedansi di tiap-tiap bus memiliki nilai yang berbeda-beda. Tabel 13 merupakan nilai impedansi yang didapat dari ETAP Power Station 12.6. Untuk perhitungan hubung singkat di lakukan pada bus 1 dengan tegangan sumber 0.4 kV dan impedansi pada tabel 13.

Tabel 13. Nilai impedansi yang didapat dari ETAP Power Station 12.6.

Bus		Positive Sequence Imp. (ohm)			Negative Sequence Imp. (ohm)			Zero Sequence Imp. (ohm)		
ID	kV	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance
Bus1	0.400	0.00212	0.01050	0.01072	0.00233	0.01015	0.01041	0.00115	0.00787	0.00796

1. Hasil Perhitungan Arus Hubung Singkat Tiga Fasa

Untuk perhitungan ini dapat di cari dengan persamaan:

$$I_a = \frac{E_a}{z_1}$$

Dimana nilai:

$$E_a = \frac{V}{\sqrt{3}} = \frac{0.4}{\sqrt{3}} = 0.2309 \text{ kV}$$

$$z_1 = 0.00212 + j0.0105$$

Sehingga:

$$I_a = \frac{0.2309}{0.00212 + j0.0105}$$

$$= \frac{0.2309 < 0}{0.010712 < 78.58}$$

$$= 21.555265 < -78.58 \text{ kA}$$

2. Hasil Perhitungan Arus Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Untuk perhitungan ini dapat dicari dengan persamaan:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{z_1 + z_2 + z_0}$$

Dimana nilai:

$$I_a = 3 \cdot I_{a1}$$

$$I_b = 0 \text{ dan } I_c = 0$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

$$E_a = \frac{V}{\sqrt{3}} = \frac{0.4}{\sqrt{3}} = 0.2309 \text{ kV}$$

$$z_1 = 0.00212 + j0.0105$$

$$z_2 = 0.00233 + j0.01015$$

$$z_0 = 0.00115 + j0.00787$$

$$z_{total} = 0.0056 + j0.02852$$

Sehingga:

$$I_{a1} = \frac{0.2309}{0.0056 + j0.02852}$$

$$= \frac{0.2309 \angle 0^\circ}{0.0290645901 \angle 87.69^\circ}$$

$$= 7.94437 \angle -87.69^\circ \text{ kA}$$

$$I_a = 3 \times 7.94437 \angle -87.69^\circ$$

$$I_a = 23.83312 \angle -87.69^\circ \text{ kA}$$

3. Hasil Perhitungan Arus Hubung Singkat Dua Fasa

Untuk perhitungan ini dapat dicari dengan persamaan:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{z_1 + z_2}$$

Dimana nilai:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

$$E_a = \frac{V}{\sqrt{3}} = \frac{0.4}{\sqrt{3}} = 0.2309 \text{ kV}$$

$$z_1 = 0.00212 + j0.0105$$

$$z_2 = 0.00233 + j0.01015$$

$$z_{total} = 0.00445 + j0.02065$$

Sehingga:

$$I_{a1} = \frac{0.2309}{0.00445 + j0.02065}$$

$$= \frac{0.2309 \angle 0^\circ}{0.0211240384 \angle 77.83^\circ}$$

$$= 10.930675 \angle -77.83^\circ \text{ kA}$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2}$$

$$I_b = 0 + (1 \angle 240^\circ)(10.930675 \angle 0^\circ) + (1 \angle 120^\circ)(-10.930675 \angle 0^\circ)$$

$$I_b = 10.930675 \angle 240^\circ + (-10.930675 \angle 120^\circ)$$

$$I_b = -5.4653375 - j9.466242231 + 5.4653375 - j9.466242231$$

$$I_b = -j18.93248446$$

$$I_b = 18.932484 \angle -90^\circ \text{ kA}$$

4. Hasil Perhitungan Arus Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah

Untuk perhitungan ini dapat dicari dengan persamaan:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{z_1 + \frac{z_0 z_2}{z_0 + z_2}}$$

$$I_{a0} = \frac{I_{a1} z_1 - E_a}{z_0}$$

$$I_{a2} = \frac{I_{a1} Z_1 - E_a}{Z_2}$$

Dimana nilai:

$$I_a = 0$$

$$E_a = \frac{V}{\sqrt{3}} = \frac{0.4}{\sqrt{3}} = 0.2309 \text{ kV}$$

$$Z_1 = 0.00212 + j0.0105$$

$$Z_2 = 0.00233 + j0.01015$$

$$Z_0 = 0.00115 + j0.00787$$

$$Z_1 + Z_0 // Z_2 = 0.00292786409 + j0.014940197$$

Sehingga:

$$I_{a1} = \frac{0.2309}{0.00292786409 + j0.014940197}$$

$$= \frac{0.2309 < 0}{0.015224385 < 78.91213601}$$

$$= 15.166458 < -78.9121 \text{ kA}$$

$$I_{a2} = \frac{((15.166458 < -78.9121) \times (0.00212 + j0.0105)) - 0.2309 < 0}{0.00233 + j0.01015}$$

$$= \frac{0.068448 < -179.224}{0.010414 < 77.071}$$

$$= 6.57269 < -256.295 \text{ kA}$$

$$I_{a0} = \frac{(15.166466 \times (0.00212 + j0.0105)) - 0.2309}{0.00115 + j0.00787}$$

$$= \frac{0.068448 < -179.224}{0.007954 < 81.686}$$

$$= 8.60548 < -260.91 \text{ kA}$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2}$$

$$I_b = 8.60548 < -260.91 + (1 < 240^\circ)(15.166458 < -78.9121) + (1 < 120^\circ)(6.57269 < -256.295)$$

$$I_b = 8.60548 < -260.91 + 15.166458 < 161.0879 + (6.57269 < -136.295)$$

$$I_b = 22.39333 < 156.7116 \text{ kA}$$

$$I_c = I_{a0} + a \cdot I_{a1} + a^2 \cdot I_{a2}$$

$$I_c = 8.60548 < -260.91 + (1 < 120^\circ)(15.166458 < -78.9121) + (1 < 240^\circ)(6.57269 < -256.295)$$

$$I_c = 8.60548 < -260.91 + 15.166458 < 41.0879 + (6.57269 < -16.295)$$

$$I_c = 23.3298 < 45.419 \text{ kA}$$

3.7 Hasil Perbandingan Perhitungan Analisis Arus Hubung Singkat

Pada bus 1 didapatkan hasil perhitungan manual arus hubung singkat tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa, dan dua fasa ke tanah. Hasil perhitungan manual ini akan dibandingkan dengan hasil simulasi dengan menggunakan ETAP Power Station 12.6. Untuk hasilnya dapat dilihat pada tabel 14, dari hasil tersebut didapatkan nilai arus hubung singkat yang berbeda. Perbedaan nilai arus tersebut dikarenakan pembulatan angka desimal.

Tabel 14. Hasil perbandingan hitungan manual dan simulasi dengan ETAP Power Station 12.6

Jenis gangguan	Hasil perbandingan		Selisih Manual - Simulasi
	Hitung manual (kA)	Simulasi (kA)	
Tiga Fasa	21.555265	21.552	0.003265
Satu Fasa Ke Tanah	23.83312	23.837	0.00388
Dua Fasa	18.9322484	18.938	0.0057516
Dua Fasa Ketanah	23,3298	23.335	0.0052

2. PENUTUP

Dari hasil analisis gangguan hubung singkat di KSO Pertamina EP-GEO Cepu Indonesia Distrik 1 Kawengan dengan menggunakan *software* ETAP Power Station 12.6 dapat diambil kesimpulannya sebagai berikut:

1. Besar arus hubung singkat tiga fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa, dan dua fasa ke tanah yang disimulasikan menghasilkan besar arus hubung singkat yang berbeda-beda, perbedaan besar arus hubung singkat tersebut dikarenakan pengaruh variasi letak gangguan dan jenis gangguan hubung singkat yang dilakukan di ETAP Power Station 12.6.

2. Semakin dekat dengan sumber pembangkit maka besar arus gangguan hubung singkat semakin besar hal ini dikarenakan didekat sumber pembangkit masih memiliki sedikit percabangan arus. Selain di dekat pembangkit gangguan di dekat beban juga memiliki arus yang cukup besar dibandingkan di antara pembangkit dan beban.
3. Jenis gangguan juga mempengaruhi besar arus gangguan hubung singkat. Dari hasil simulasi gangguan hubung singkat terbesar terjadi pada gangguan satu fasa ke tanah. Hal ini karena tegangannya satu fasa maka menghasilkan arus yang besar.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada pihak – pihak yang senantiasa mengeluarkan waktunya untuk memberikan bantuan dalam menyelesaikan tugas akhir sebagai berikut:

1. ALLAH SWT dan Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan banyak kenikmatan dan kemuliaannya.
2. Bapak dan ibu tercinta yang telah mendo'akan, memberikan nasehat dan semangat dalam pengerjaan Tugas Akhir.
3. Bapak Umar S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta.
4. Bapak ir. Jatmiko, M.T. selaku dosen pembimbing.
5. Bapak dan ibu Dosen Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.
6. Bapak Imawanto selaku maintenance di Geo Cepu Indonesia yang telah membantu memberikan dan menjelaskan data-data yang diperlukan untuk Tugas Akhir.
7. Bapak Abdul Aziz dan Bapak Gitab Bangkit yang telah membimbing penulis sewaktu Kerja Praktek dan mengarahkan sehingga penulis mendapat ide Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman Teknik Elektro UMS angkatan 2012 yaitu Cahyo Kumolo, Adib Budi R, Reynaldo Hilga A. P, Saleh Syahmi, Muhammad Pangeran A dan teman-teman yang tidak dapat penulis sebut satu per satu yang telah memberikan motivasi dan dukungan yang sangat membantu.
9. Serta pihak lain yang tidak dapat penulis sebut satu per satu yang telah memberikan dukungan, bantuan serta do'a.

DAFTAR PUSTAKA

- Amira. *Analisa Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa Ke Tanah*, Jurnal Teknik Elektro ITP Volume 3 No. 2; Juli 2014
- Azis, Mohammad Wahyu, 2011, *Analisis Gangguan Hubung Singkat Penyulang Jajar 01 Menggunakan Software ETAP*, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Chunju Fan. 2015. Short-circuit current calculation method for partial coupling transmission lines under different voltage levels. *Journal Electrical Power and Energy Systems* 647-654
- Kholis, Ikhwannul. “Analisis Gangguan Hubung Singkat” 12 Desember 2013. <https://ikkholis27.wordpress.com/2013/11/12/analisis-gangguan-hubung-singkat/>
- Mathur, akhilesh., Pan, vinay., das biswarup. 2015. Unsymmetrical short-circuit analysis for distribution system considering loads. *Journal Electrical Power and Energy Systems*, 70, 27-38.
- Moura, Ailson P., Paces lopes, J. A., de Maura ardiano, A.f. 2015. Sequence networks to the calculation of two-simultaneous faults at the same location. *Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 69, 414-420.
- Rahim, Aulia. *Studi Hubung Singkat Untuk Gangguan Simetris Dan Tidak Simetris*, Universitas Andalas, Padang, 2011.
- Saha, s., aldeen, m., tan, C. P. 2013. Unsymmetrical fault diagnosis in transmission/distribution networks. *Journal of Electrical Power and Energy System*, 45, 252-263.
- Youssef, karim hasan., abouelenin, fathy mabrouk. 2016. Analysis of simultaneous unbalanced short circuit and open conductor fault in power systems with untransposed line and six-phase sections. *Journal Alexandria Engineering*, xxx, xxx-xxx.